

*На правах рукописи*



**ЯКШИНА ВИКТОРИЯ ВЛАДИМИРОВНА**

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОТКРЫТОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ  
С ФОРМИРОВАНИЕМ ТЕХНОГЕННОЙ ЕМКОСТИ ДЛЯ  
РАЗМЕЩЕНИЯ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД**

Специальность

25.00.22 – Геотехнология (подземная, открытая и строительная)

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор,  
**Пыталев Иван Алексеевич**

**Официальные оппоненты:** **Стась Галина Викторовна**,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула,  
доцент кафедры геотехнологий и строительства  
подземных сооружений

**Есина Екатерина Николаевна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБУН «Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской академии наук», г. Москва,  
старший научный сотрудник

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «05» июля 2022 г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.111.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова») по адресу: 455000, Челябинская область, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»: <https://magtu.ru>.

Автореферат разослан « » мая 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук



Корнилов Сергей Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В результате функционирования горнодобывающих предприятий при постоянном росте спроса на минеральное сырье, а также снижении качества полезных ископаемых и постоянном усложнении горно-геологических, горнотехнических условий открытых горных работ, неизбежно увеличиваются объемы техногенных образований в виде отвалов вскрышных пород и хвостохранилищ. Ежегодно в России в результате добычи и переработки полезных ископаемых образуется не менее 7 млрд. т отходов. В связи с этим, особо актуальным становится вопрос поиска технических решений, позволяющих на ограниченной территории размещать максимально эффективно объемы пород вскрыши и хвостов обогащения горнодобывающих предприятий.

В практике горнодобывающих предприятий имеется положительный опыт использования выработанного пространства карьеров для размещения хвостов обогащения руд, а вскрышных пород – для строительства ограждающих дамб, при этом данные решения носят единичный характер и являются локальными решениями производственных задач. Однако формирование пионерных и ограждающих дамб в период наращивания или реконструкции хвостохранилищ осуществляется с использованием попутных вскрышных пород, объем которых ограничен режимом горных работ и требуемым объемом подготовленных запасов к выемке. При этом складирование отходов обогащения в выработанном пространстве карьера реализуется исключительно после полной отработки всех запасов. Отсутствие научно-методических рекомендаций и геотехнологических решений по рациональному использованию вскрышных пород для формирования техногенных объектов в процессе ведения добычных работ сдерживает целенаправленное формирование техногенной емкости для размещения хвостов обогащения в выработанном пространстве карьера и на дневной поверхности.

В связи с этим, решение вопроса одновременной добычи полезных ископаемых и размещения хвостов обогащения, в пределах осваиваемого участка недр Земли, в целенаправленно созданные техногенные емкости с использованием пород вскрыши, позволит обеспечить повышение экологической безопасности и эффективности горнодобывающих предприятий с учетом наметившегося дефицита земельных ресурсов во всех субъектах страны.

Поэтому обоснование параметров открытой геотехнологии с формированием техногенной емкости для размещения хвостов обогащения руд, при увязке производительности карьера по горной массе и производственной мощности обогатительной фабрики по хвостам, является актуальной научно-практической задачей.

**Цель работы.** Разработка методики обоснования параметров открытой геотехнологии и условий размещения хвостов обогащения руд в техногенные емкости, формируемые и эксплуатируемые в ходе развития горных работ для повышения полноты и комплексности освоения участка недр.

**Идея работы.** Регулирование режима горных работ по требуемому объему вскрышных пород для формирования техногенной емкости достигается последовательной выемкой и складированием строительных и изоляционных материалов, с учетом их физико-механических характеристик.

### **Задачи исследования:**

- анализ состояния и опыта ведения открытых горных работ с использованием выработанных пространств карьеров и пород вскрыши, с целью формирования емкостей для размещения отходов производства;
- систематизация факторов, определяющих условия размещения хвостов обогащения руд в выработанном пространстве карьера;
- разработка способов формирования и обоснование параметров ограждающей дамбы техногенной емкости;
- обоснование способов создания инженерной системы защиты техногенной емкости для обеспечения экологической безопасности;
- корректировка параметров открытых горных работ при формировании и эксплуатации техногенной емкости для размещения хвостов обогащения руд;
- экономическое обоснование целесообразности формирования техногенной емкости для размещения хвостов обогащения; технико-экономическая оценка предлагаемых технологических решений.

### **Объект исследования:**

- горнотехническая система открытой геотехнологии, предусматривающая размещение хвостов обогащения руд в техногенной емкости, формируемой в ходе развития открытых горных работ.

### **Предмет исследования:**

- параметры открытой геотехнологии, обеспечивающей согласование режима горных работ с объемами пород, используемых при формировании техногенной емкости для размещения хвостов обогащения руд.

**Методы исследования.** В работе применен комплексный метод исследований, включающий: анализ и научное обобщение положительного опыта освоения месторождений при открытом способе разработки с формированием техногенных емкостей для складирования хвостов обогащения; математическое, каркасное и имитационное моделирование технологических процессов; метод определения физико-механических свойств рыхлых и скальных пород вскрыши; технико-экономический анализ.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Повышение полноты и комплексности освоения участка недр при открытой разработке месторождений обеспечивается формированием техногенной емкости заданной конструкции, инженерной системы защиты для размещения хвостов обогащения руд, достигается регулированием режима горных работ на основе учета необходимых объемов вскрышных пород, с требуемыми физико-механическими характеристиками, используемых в ходе ведения горных работ для строительства ограждающей дамбы.

2. Разделение вскрышных пород по требуемым физико-механическим характеристикам позволяет использовать их в качестве строительных и изоляционных материалов при формировании ограждающей дамбы и является условием регулирования режима горных работ, в соответствии с разработанной динамической моделью управления объемами горной массы, в зависимости от дальности транспортирования, типа применяемого подвижного состава и пространственного положения рыхлых и скальных пород в теле дамбы и карьерном поле.

3. Повышение вместимости техногенной емкости обеспечивается увеличением угла ее внутреннего откоса до  $89^\circ$  и достигается использованием габионных конструкций при высоте ограждающей дамбы до 25 м, а уменьшение угла внешнего откоса дамбы до установленной величины, согласно выбранному направлению рекультивации, позволяет проводить рекультивацию земель в процессе ведения горных работ.

**Достоверность результатов** обеспечивается: надежностью и представительным объемом исходных данных; использованием современных программных средств при разработке и проведении компьютерного моделирования; подтверждается: согласованностью данных, полученных различными методами исследования, между собой и с данными практики; положительными результатами применения научно-методических положений диссертации в промышленных условиях.

#### **Научная новизна:**

1. Систематизация техногенных емкостей для размещения хвостов обогащения по расположению относительно земной поверхности, способу возведения и увязки технологических процессов горных работ, использование которой позволяет выбрать тип, конструкцию, параметры и систему инженерной защиты ограждающих дамб.

2. Методика обоснования параметров открытой геотехнологии с формированием техногенной емкости для размещения хвостов обогащения руд, определяющая конструкцию ограждающей дамбы, необходимые объемы строительного и изоляционного материалов, а также физико-механические характеристики и пространственное положение рыхлых и скальных пород в теле дамбы и карьере поле.

**Личный вклад автора** состоит в постановке цели и задач исследования; систематизации техногенных емкостей; обосновании способов и условий выбора конструкций инженерной системы защиты ограждающей дамбы техногенной емкости; создании алгоритма формирования техногенной емкости горнотехнической системы при комплексном освоении участка недр; разработке методики определения параметров формируемой техногенной емкости с заданными технологическими характеристиками; моделировании горнотехнической системы.

**Практическая значимость работы** заключается в разработанных технологических схемах габионных конструкций при строительстве ограждающих дамб, применение которых позволяет увеличить вместимость техногенной емкости; в определении рациональных параметров открытой геотехнологии с формированием техногенной емкости для снижения площади нарушенных земель; рекомендациях по применению схем вскрытия и созданию технологических площадок в пределах контура основания ограждающей дамбы для селективного складирования рыхлых и скальных пород при формировании и эксплуатации техногенной емкости в период ведения горных работ.

Научное и практическое значение работы подтверждено ее выполнением при поддержке гранта Президента РФ МД-3602.2021.1.5.

Эффективность разработанных технологий подтверждена актом внедрения результатов диссертационного исследования на ООО «Семеновский рудник» с указанием экономического эффекта.

#### **Реализация результатов исследования:**

Результаты и научно-практические рекомендации диссертационного исследе-

дования использованы в проектах разработки месторождений Челябинской, Оренбургской областей; при разработке основных технических решений Куранахского рудного поля; при выполнении исследований в рамках гранта Президиума РФ МД-3602.2021.1.5 «Обоснование параметров карьеров и отвалов, формируемых в качестве техногенных емкостей»; при разработке патента на изобретение «Способ совмещения работ по добыче полезных ископаемых и восстановлению земель при разработке крутопадающих месторождений», регистрационный номер № 2719894 РФ. Материалы диссертации использованы в учебном процессе по дисциплинам: «Комплексное освоение недр», «Комплексная оценка технологических решений» специальности 21.05.04.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XXIX Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2021 г.); X, XI Международной конференции «Комбинированная геотехнология» (г. Магнитогорск, 2019, 2021 гг.); II, III Всероссийской научно-практической конференции «Золото. Полиметаллы. XXI век» (г. Челябинск, 2020, 2022 гг.).

### **Публикации**

Основные положения диссертации опубликованы в 9 научных работах. Из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ и входящих в международные базы цитирования Web of Science; 5 – в прочих изданиях, научная новизна подтверждена 1 патентом на изобретение.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 169 страницах машинописного текста, содержит 88 рисунков, 12 таблиц, библиографический список из 149 наименований и приложение.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*В первой главе проведен анализ современного состояния открытых горных работ, положительного опыта использования выработанного пространства карьера, хвостохранилищ и отвалов, а также научно-методической базы определения параметров открытой геотехнологии.*

Мировой спрос на минерально-сырьевые ресурсы за последние десятилетия увеличился на 97%. Одной из причин этого является рост населения Земли, и как следствие, увеличение потребности в сырье на фоне истощения минерально-сырьевой базы горнодобывающих предприятий. В связи с чем возникает необходимость поиска технологий повышения эффективности функционирования горнодобывающих предприятий при вовлечении в разработку месторождений с низким содержанием полезных компонентов. В промышленно развитых регионах страны особо остро стоит вопрос отчуждения свободной площади земель для размещения отвалов вскрышных пород и продуктов переработки полезных ископаемых – хвостов обогащения. Фактически наличие территорий для складирования вскрыши и хвостов обогащения становится условием ведения добычных работ.

Анализ опыта использования выработанного пространства карьера показал,

что распространение получили решения по складированию продуктов сгущения хвостов обогащения.

Исследованиям в области определения параметров открытой геотехнологии, формирования техногенных емкостей, управления отходами добычи и переработки полезных ископаемых, а также повышения эффективности при разработке месторождений полезных ископаемых посвящены научные труды ведущих ученых: академиков М.И. Агошкова, Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, К. Н. Трубецкого, член-корреспондентов РАН Д.Р. Каплунова, В.Л. Яковлева, д.т.н. А.И. Арсентьева, С.Е. Гавришева, В.А. Галкина, И.А. Пыталева, М.В. Рьльниковой, Г.Г. Саканцева, Г.В. Стась, Г.А. Холоднякова, В.С. Хохрякова и многих других ученых и инженеров, внесших значительный вклад в развитие науки и производства.

В отечественной практике открытых горных работ целенаправленное формирование техногенной емкости, в том числе в период освоения балансовых запасов, сдерживается отсутствием исследований согласования производительности карьера по горной массе и годового объема хвостов обогатительной фабрики при их складировании, отсутствием проработанной методики обоснования параметров горнотехнической системы, учитывающих конструкцию ограждающей дамбы, необходимый объем строительного и изоляционного материалов, а также физико-механические характеристики и пространственное положение рыхлых и скальных пород.

*Во второй главе исследованы факторы, влияющие на возможность использования выработанного пространства карьеров при размещении хвостов обогащения, предложены варианты способов повышения вместимости техногенной емкости при комплексном освоении участка недр, систематизированы факторы, определяющие условия использования рыхлых и вскрышных пород для формирования ограждающей дамбы.*

С целью определения возможности и условий создания техногенной емкости для складирования хвостов обогащения, в работе исследованы факторы, влияющие на полноту, эффективность и экологическую безопасность комплексного освоения участка недр Земли.

Исследованиями установлено, что в зависимости от соотношения в хвостах обогащения твердого к жидкому, угол их растекания изменяется в пределах от 1 до 14 градусов. В работе, с использованием трехмерной среды моделирования, проведены исследования, в результате которых установлено, что выбор схемы вскрытия и возможность использования ее элементов для осуществления мониторинга состояния массива, определяется с учетом угла растекания хвостов и расположения точек их сброса в формируемую техногенную емкость.

Моделирование схем вскрытия месторождений с различными формами трасс позволило выявить рациональные варианты расположения точек сброса:

- при тупиковой форме трассы предусматривается два варианта сброса хвостов обогащения. Первый вариант – сброс текущих хвостов или продуктов их сгущения осуществляется с двух точек на противоположном борту карьера (рисунок 1а). Второй вариант – сброс с одной точки, расположенной на противоположном борту. Данный способ является менее эффективным, поскольку

требует использования двух плавучих насосных станций и капитальных съездов, расположенных с торца каждого борта (рисунок 1б).

- при петлевой форме трассы расположение точек сброса предусматривается на противоположном борту в средней точке пересечения линий, перпендикулярных к осям транспортных берм (рисунок 1в).

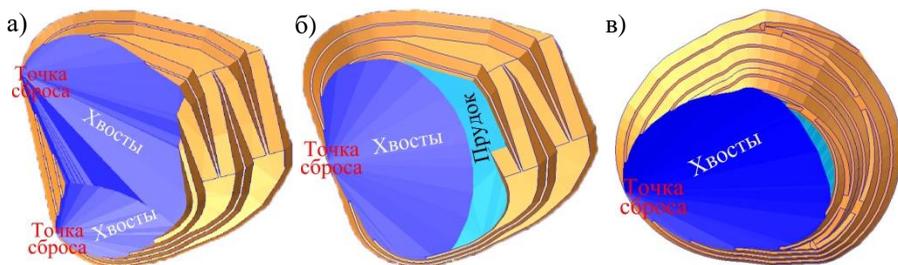


Рисунок 1 – Схема складирования хвостов обогатительной фабрики в карьер с тупиковой и петлевой формой трассы

- при спиральной форме трассы, доказано, что исключается возможность использования выработанного пространства карьера в качестве техногенной емкости, поскольку в период ее эксплуатации не обеспечивается доступ на транспортные бермы для откачки оборотной воды и проведения геомеханического мониторинга природного и техногенного массива.

Доказано, что петлевая форма трассы является оптимальной при формировании выработанного пространства карьера в качестве техногенной емкости.

В результате моделирования схем вскрытия крутопадающих месторождений, обеспечивающих добычу полезных ископаемых и последующее складирование хвостов обогащения, установлены зависимости изменения объемов горной массы в контуре карьера от глубины карьера (рисунок 2).

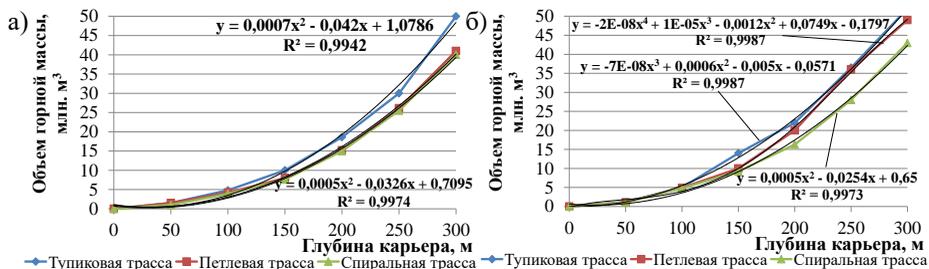


Рисунок 2 – Зависимость объема горной массы от глубины карьера:

а) круглая форма карьера в плане; б) прямоугольная форма карьера в плане

Эксплуатация техногенной емкости, созданной на базе выработанного пространства карьера, возможна только при функционировании плавучей насосной станции, монтаж и обслуживание которой предусматривается в соответствии с принятой схемой вскрытия. В работе предложена схема реконструкции транспортной бермы с целью изменения ее функционального назначения (рисунок 3).

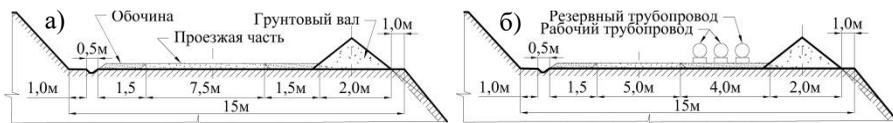


Рисунок 3 – Схема реконструкции транспортной бермы:  
а) ведение добычных работ; б) эксплуатация техногенной емкости

В результате анализа элементов транспортной бермы в стесненных условиях, установлено, что принятые параметры обеспечивают возможность их использования без увеличения ширины при эксплуатации техногенной емкости.

В работе предложен вариант увеличения вместимости техногенной емкости, формируемой на базе выработанного пространства карьера за счет создания на дневной поверхности по его периметру ограждающих дамб.

С целью повышения вместимости техногенной емкости при снижении площади отчуждаемых земель, в работе предложено использование габионных конструкций или подпорных стенок для увеличения угла внутреннего откоса ограждающей дамбы (рисунок 4). Установлено, что применение габионных конструкций обуславливается физико-механическими характеристиками пород вскрыши и высотой ограждающей дамбы.

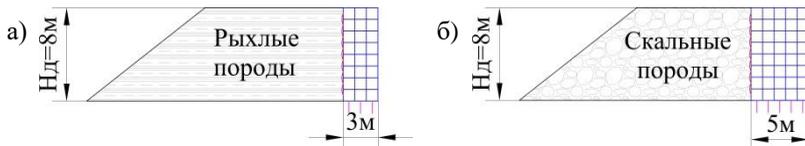


Рисунок 4 – Конструкция ограждающей дамбы техногенной емкости с габионной стеной

а – дамба из рыхлых пород, высотой 8 м; б – дамба из скальных пород, высотой 8 м

В работе предложена методика расчета устойчивости ограждающей дамбы при формировании откоса техногенной емкости с использованием габионов.

Ширина подпорной стенки каждого яруса габионов определяется:

$$d = \frac{K_{з\gamma} \cdot H_d \cdot \gamma_{п.д.}}{2 \cdot \gamma_{п.г.} \cdot \operatorname{tg} \varphi_2 \cdot \cos \alpha_e}, \quad (1)$$

где  $K_{з\gamma}$  – коэффициент запаса устойчивости;  $H_d$  – высота дамбы, м;  $\gamma_{п.д.}$  – плотность пород дамбы, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{п.г.}$  – плотность пород габиона, кг/м<sup>3</sup>;  $\varphi_2$  – угол внутреннего трения пород габиона, град;  $\alpha_e$  – угол естественного откоса пород дамбы, град.

В результате моделирования конструкции откоса ограждающей дамбы с использованием габионов установлена зависимость результирующего угла и удельных затрат на ее формирование от высоты дамбы при обеспечении устойчивости (рисунок 5).

Для обеспечения экологической безопасности, за счет предотвращения миграции загрязняющих веществ в окружающую среду при формировании и эксплуатации техногенной емкости, предусматривается создание системы инженерной защиты. В результате исследования механизма переноса загрязняющих веществ и анализа применяемых гидроизоляционных материалов, в рабо-

те предложена классификация инженерных систем защиты с рекомендациями их применения при формировании и эксплуатации техногенной емкости.

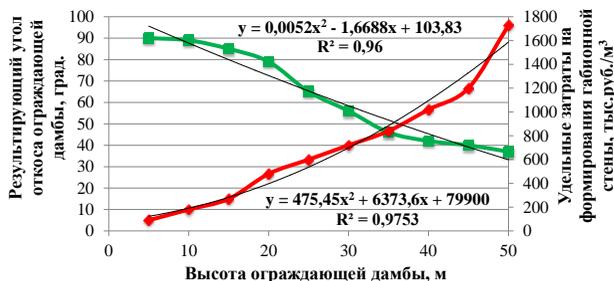


Рисунок 5 – Зависимость результирующего угла внутреннего откоса и удельных затрат на формирование дамбы от ее высоты:

— угол откоса  
— затраты

Комплексное освоение участка недр обеспечивается формированием техногенной емкости путем создания ограждающей дамбы по периметру карьера с оставлением технологических проездов на период отработки запасов полезных ископаемых.

В работе доказано, что формирование ограждающей дамбы для создания техногенной емкости возможно как на дневной поверхности, так и в карьере, в том числе в период ведения горных работ.

С целью обоснования параметров открытой геотехнологии при формировании ограждающей дамбы техногенной емкости на дневной поверхности вдоль верхней бровки карьера (рисунок 6), разработана методика определения объемов выработанного пространства, вскрышных пород, используемых в качестве строительного и изоляционного материалов, а также площади основания ограждающей дамбы с учетом формы карьера в плане.

Для повышения эффективности комплексного освоения участка недр открытой геотехнологией необходимо выбрать тип, конструкцию, параметры и систему инженерной защиты техногенной емкости на основе предложенной систематизации (таблица 1). Доказано, что регулирование режима горных работ должно осуществляться с учетом необходимых объемов вскрыши для создания техногенной емкости.

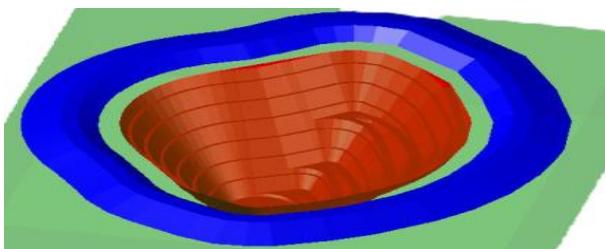


Рисунок 6 – Техногенная емкость, сформированная на базе отработанного карьера

Определение объема выработанного пространства карьера ( $V_{ВПК}$ ) для округлых в плане карьеров рассчитывается с учетом его радиуса по поверхности:

$$R_{кар} = R_{дно} + H \cdot ctg \alpha_{кар}, \quad (2)$$

где  $R_{дно}$  – радиус карьера по дну, м;  $H$  – глубина карьера, м;  $\alpha_{кар}$  – результирующий угол борта карьера, град.

Таблица 1 – Систематизация техногенных емкостей

Признак		Техногенная емкость		
Расположение относительно земной поверхности		Поверхностные (плотинные)	Глубинные (бесплотинные)	Комбинированные (поверхностно-глубинные)
Способ возведения		отсыпка; намыв	–	отсыпка
Увязка процесса с ведением горных работ	Строительство	Процесс формирования зависит от наличия пород вскрыши, используемых в качестве материала для строительства, отвечающим требуемым характеристикам	–	Процесс формирования связан с ведением вскрышных работ и наличием пород, используемых в качестве материала для строительства, отвечающим требуемым характеристикам
	Эксплуатация	Эксплуатация техногенной емкости зависит от работы обогатительной фабрики	Складирование отходов обогатительной фабрики и продуктов их переработки осуществляется после полной отработки месторождения открытым способом. А также в период ведения горных работ с выполнением ряда технических и технологических требований	
Срок эксплуатации		С момента строительства до достижения проектной отметки уложенных хвостов	С момента отработки запасов открытым способом до достижения проектной отметки уложенных хвостов	С момента достижения нижней отметки карьерной выемки до проектной отметки уложенных хвостов
Наличие технологических коммуникаций		-технологические съезды на внешних откосах ограждающей дамбы, через каждые 2000 м; -технологические съезды для обслуживания плавучих насосных станций; -формирование разворотных площадок через каждые 500 м.	Формирование съезда для обслуживания плавучей насосной станции (ПНС) на противоположной стороне от точки сброса хвостов.	-технологические съезды на внешних откосах ограждающей дамбы, через каждые 2000 м; -технологические съезды для обслуживания ПНС расположенные на противоположной стороне от точки сброса хвостов; -формирование разворотных площадок через каждые 500 м;
Система инженерной защиты		Мероприятия по предотвращению миграции загрязняющих веществ путем формирования: <i>глиняного ядра, противодиффузионных экранов, нанесения торкрет-смеси, геомембраны, геотекстиль, полимерные покрытия</i>	Мероприятия, предотвращающие механизмы переноса: конвективный; диффузионный; дисперсионный	-создание зоны предохранительной зоны, расположенной между верхней бровкой борта карьера и нижней бровкой внутреннего откоса ограждающей дамбы
Рекультивация нарушенных земель и срок их сдачи		После полного заполнения техногенной емкости хвостами обогащения		<i>Внешнего откоса дамбы</i> - после возведения ограждающей дамбы до проектной высоты <i>Гребня дамбы и поверхности уложенных хвостов</i> - после достижения проектной отметки хвостов

$$V_{ВПК} = \frac{1}{3} H \cdot (\pi \cdot R_{дно}^2 + \sqrt{\pi \cdot R_{дно}^2 \cdot \pi \cdot R_{кар}^2} + \pi \cdot R_{кар}^2), \quad (3)$$

Объем вскрышных пород определяется по формуле:

$$V_{вск} = V_{ВПК} - \left( \frac{V_{ВПК}}{K_в + 1} \right), \quad (4)$$

где  $K_в$  – коэффициент вскрыши,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Расстояние от верхней бровки карьера до ограждающей дамбы (центр ее массы как геометрической фигуры) определяется по формуле

$$B = C + C_2, \quad (5)$$

где  $C$  – безопасное расстояние между бровкой карьера и ограждающей дамбой, м;

$C_2$  – расстояние между нижней бровкой откоса дамбы и центром тяжести ограждающей дамбы, м.

$$C_2 = \left( (b_д/2) - C_1 \right) / 2 + C_1, \quad (6)$$

где  $b_д$  – длина основания дамбы, м;

$C_1$  – расстояние от  $C$  до центром верхнего основания дамбы, м

$$C_1 = a_{дамба} / 2 + (h_{дамба} \cdot ctg \beta_{дамба}), \quad (7)$$

где  $a_{дамба}$  – длина гребня дамбы, м;  $h_{дамбы}$  – высота ограждающей дамбы, м;

$\beta_{дамбы}$  – угол откоса дамбы, град.

Длина нижнего основания дамбы:

$$b_{дамба} = a_{дамба} + (h_{дамба} \cdot ctg \beta_{дамба} + h_{дамба} \cdot ctg \beta_{рекул}), \quad (8)$$

где  $\beta_{рекул}$  – угол откоса дамбы для рекультивации, град.

Площадь поперечного сечения ограждающей дамбы определяется:

$$S_{дамба} = \left( (a_{дамба} + b_{дамба}) / 2 \right) \cdot h_{дамба}. \quad (9)$$

Общая протяженность ограждающей дамбы, м

$$L_{дамба} = 2\pi \cdot (R_{кар} + B). \quad (10)$$

Объем материала, необходимого для строительства ограждающей дамбы

$$V_{дамба} = L_{дамба} \cdot S_{дамба}. \quad (11)$$

С целью обоснования параметров открытой геотехнологии при формировании техногенной емкости в выработанном пространстве карьера при ведении добычных работ (рисунок 7), разработана методика определения ее вместимости, объемов вскрышных пород, используемых для создания ограждающей дамбы и площади ее основания с учетом принятой системы разработки месторождения.

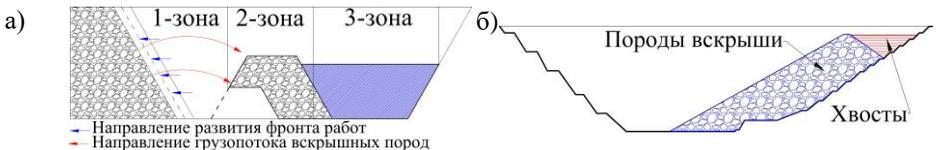


Рисунок 7 – Схема складирования хвостов обогащения в отработанную часть карьера в период ведения добычных работ:

а) сплошная система разработки; б) углубочная система разработки

Ширина гребня дамбы рассчитывается по формуле:

$$A = 2 \cdot (a + y) + x + d_{тр} \cdot (N_{шт. пр.} - 1), \quad (12)$$

где  $a$  – ширина автосамосвала, м;  $y$  – ширина предохранительной полосы между автомобилем и краем проезжей части, м;  $x$  – безопасный зазор между встречными машинами, м;  $N_{\text{инт.тр.}}$  – количество трубопроводов, расположенных на гребне дамбы, шт.;  $d_{\text{тр}}$  – диаметр трубопровода, м.

Ширина основания дамбы рассчитывается по формуле:

$$B = h_d \cdot (\text{ctg}\alpha_1 + \text{ctg}\alpha_2) + A, \quad (13)$$

где  $h_d$  – высота ограждающей дамбы, м;  $\text{ctg}\alpha_1$  – угол низового откоса дамбы, град.;  $\text{ctg}\alpha_2$  – угол верхового откоса дамбы, град.

Для прямоугольной формы карьера в плане, протяженность дамбы по верху рассчитывается по формуле:

$$L_{\text{пр.д}} = 2 \cdot (h_d \cdot \text{ctg}\alpha_k) + d_{\text{мб}}, \quad (14)$$

где  $\text{ctg}\alpha_k$  – угол откоса карьера, град.;  $d_{\text{мб}}$  – расстояние между противоположными бортами карьера, м.

Объем вскрышной породы, используемой для формирования дамбы:

$$V_d = 1/2 \cdot (h_d \cdot (\text{Ш}_{\text{д2}} + A) + \Delta h_{\text{д1}} \cdot (\Delta h_{\text{д1}} \cdot \text{ctg}\alpha_k) \cdot A + \Delta h_{\text{д3}} \cdot (\Delta h_{\text{д3}} \cdot \text{ctg}\alpha_k) \cdot A) + \\ + 1/3 \cdot (\text{Ш}_{\text{д1}} \cdot \Delta h_{\text{д1}} \cdot (\Delta h_{\text{д1}} \cdot \text{ctg}\alpha_k) + \text{Ш}_{\text{д3}} \cdot \Delta h_{\text{д3}} \cdot (\Delta h_{\text{д3}} \cdot \text{ctg}\alpha_k)), \quad (15)$$

где  $h_d$  – высота ограждающей дамбы, м;  $\Delta h_{\text{д1}}$ ,  $\Delta h_{\text{д3}}$  – расстояние от гребня дамбы до центральной точки сопряжения ее откоса соответственно с бортом карьера, м;  $\text{Ш}_{\text{д1}}$  – ширина дамбы понизу, м;  $\text{Ш}_{\text{д2}}$ ,  $\text{Ш}_{\text{д3}}$  – расстояние между центральными точками линий сопряжения внешнего и внутреннего откосов дамбы, соответственно, с бортом карьера, м.

Объем техногенной емкости рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{ем}} = h_{\text{ем}}/3 \cdot \left( (d_{\text{низ}} \cdot (\text{Ш}_{\text{к.низ}} - \text{Ш}_{\text{д2}})) + d_{\text{верх}} \cdot (h_{\text{ем}} \cdot \text{ctg}\alpha_k + \text{Ш}_{\text{к.низ}} - \text{Ш}_{\text{д2}} + h_{\text{ем}} \cdot \text{ctg}\alpha_2) \right) + \\ + \sqrt{(\text{Ш}_{\text{к.низ}} - \text{Ш}_{\text{д2}}) \cdot d_{\text{низ}} \cdot (d_{\text{верх}} \cdot (h_{\text{ем}} \cdot \text{ctg}\alpha_k + \text{Ш}_{\text{к.низ}} - \text{Ш}_{\text{д2}} + h_{\text{ем}} \cdot \text{ctg}\alpha_2))}. \quad (16)$$

где  $h_{\text{ем}}$  – высота техногенной емкости, м;  $\text{Ш}_{\text{к.низ}}$  – ширина карьера понизу, м.

*В третьей главе рассмотрен механизм согласования добычи полезных ископаемых и одновременного формирования техногенной емкости для размещения хвостов обогащения с учетом производственной мощности фабрики; разработан алгоритм выбора параметров открытой геотехнологии и номограмма согласования производительности карьера по горной массе и обогатительной фабрики по хвостам.*

При формировании техногенной емкости эффективность ведения горных работ достигается дополнительными операциями при выполнении технологических процессов. Разделение пород по физико-механическим свойствам обеспечивает их использование в качестве строительного и изоляционного материалов для рационального складирования на технологических площадках при формировании техногенной емкости.

Использование вскрышных пород в качестве строительного материала возможно при соблюдении повышенных требований к фракционному составу. Крупность материала, отсыпаемого с послойной укаткой, должна быть не более 0,75 толщины отсыпаемого слоя. Требуемый размер куска предлагается обеспечивать непосредственно на рабочем горизонте, путем определения ра-

циональных параметров буровзрывных работ или с применением мобильной дробильно-сортировочной установки непосредственно в забое или в месте формирования дамбы.

С целью отсыпки ограждающей дамбы породами вскрыши предусматривается, что их транспортирование должно осуществляться на наиболее удаленную точку технологической площадки от соответствующей въездной траншеи. По мере развития и понижения горных работ осуществляется подвигание фронта работ по возведению дамбы от внешнего к внутреннему откосу, что обеспечивает постоянные эксплуатационные затраты. При этом возможно выполнение работ по рекультивации, включающих формирование угла внешнего откоса дамбы в период ее строительства с учетом выбранного направления рекультивации, а выполнение биологического этапа и сдачи земель обеспечивает сокращение затрат на их аренду.

Обоснованы два направления создания техногенной емкости:

- эксплуатация существующей емкости на базе ранее отработанного карьера;
- формирование при освоении ранее неразрабатываемого участка недр.

В соответствии с первым направлением, формирование техногенной емкости предусматривается за счет создания ограждающей дамбы по периметру ранее отработанного карьера. Второе направление предполагает определение очередности отработки залежей полезных ископаемых обособленными карьерами и формирование техногенной емкости на базе обрабатываемого карьера. При этом, на период отработки запасов пионерного карьера предусматривается создание техногенной емкости на дневной поверхности (рисунок 8).

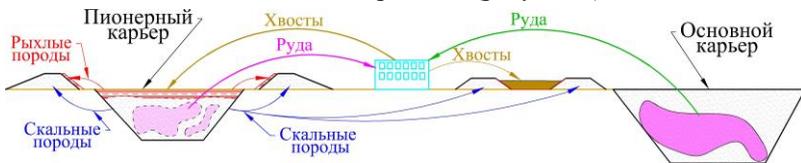


Рисунок 8 – Схема комплексного освоения участка недр при формировании техногенной емкости

С целью согласования производственных мощностей карьера по горной массе и обогатительной фабрики по хвостам при формировании и заполнении техногенной емкости разработано условие увязки технологических процессов в пространстве и во времени.

$$\begin{aligned} \Pi_{эм} &= f(\Pi_{ПИ}; V_{BC}; V_{BP}; V_{TE}; \Pi_{ОФ}; B_K; T_3) \\ \left\{ \begin{aligned} V_{TE} &\geq (\Pi_{ОФ} - B_K) \cdot T_3; \\ V_{ОД} &= V_{BC} + V_{BP}; \\ V_{BC} &= S_{сеч.од} \cdot L_{од}; \\ V_{BP} &= S_{сеч.лсз} \cdot L_{од}; \\ V_{ВСК} &\geq V_{ВПИ} \in [V_{BC} + V_{BP}]. \end{aligned} \right. \quad (17) \end{aligned}$$

где  $\Pi_{эм}$  – производительность карьера по горной массе,  $m^3$ ;  $\Pi_{ПИ}$  – производительность карьера по полезному ископаемому,  $m^3$ ;  $V_{bc}$  – объем скальной вскрыши,  $m^3$ ;

$V_{вр}$  – объем рыхлой вскрыши,  $m^3$ ;  $P_{оф}$  – производительность обогатительной фабрики,  $m^3/год$ ;  $V_k$  – выход концентрата,  $m^3$ ;  $V_{од}$  – объем материала, необходимого для отсыпки ограждающей дамбы,  $m^3$ ;  $T_3$  – время заполнения техногенной емкости, лет;  $S_{сеч-од}$  – площадь сечения ограждающей дамбы,  $m^2$ ;  $S_{сеч-исз}$  – площадь сечения изоляционного слоя (конструкции),  $m^2$ ;  $L_{од}$  – протяженность ограждающей дамбы, м;  $V_{вск}$  – объем вскрышных пород,  $m^3$ ;  $V_{впн}$  – объем вскрыши, необходимый для обеспечения требуемых объемов подготовленных к выемке запасов,  $m^3$ ;  $V_{те}$  – объем техногенной емкости,  $m^3$ .

С целью определения годового объема горной массы, с учетом увязки производительности карьера по полезному ископаемому и объему скальных и рыхлых пород вскрыши, используемых для создания ограждающей дамбы и инженерной системы защиты техногенной емкости, при обеспечении требуемого объема для размещения хвостов обогащения, разработана номограмма (рисунок 9).

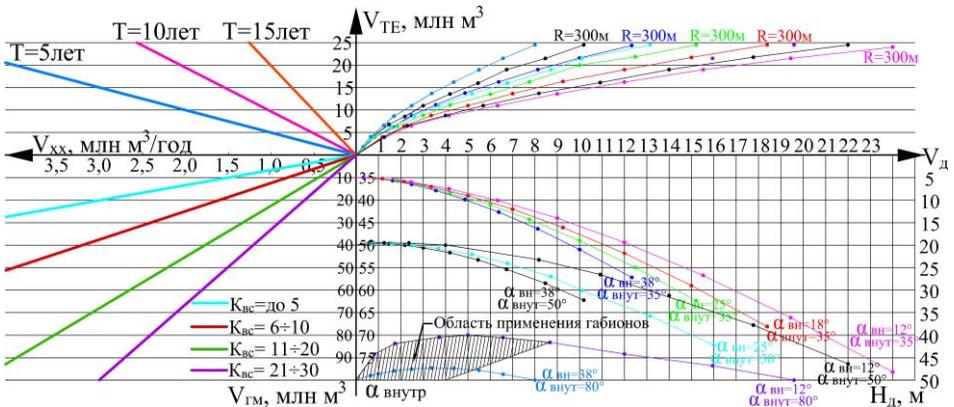


Рисунок 9 – Номограмма согласования производительности карьера по горной массе и обогатительной фабрики по хвостам

Для определения рациональной последовательности отработки залежей, на основе программного комплекса AnyLogic, разработана программа, позволяющая определить потенциальные участки первоначальной отработки с учетом взаимоувязки технологических процессов добычных, вскрышных работ и обогатительной фабрики.

При формировании ограждающей дамбы, обоснована необходимость регулирования режима горных работ, на основе учета требуемого объема добычи и необходимого объема вскрышных пород для создания техногенной емкости и ее инженерной системы защиты.

В работе обосновано распределение объемов горных работ на основе установленных функциональных зависимостей объемов полезного ископаемого и пород вскрыши, с учетом календарного плана добычных работ и дифференцирования скальных и рыхлых пород по требуемому качеству строительных и изоляционных материалов.

Предложено два варианта регулирования дифференцированных пород вскрыши для условий: дефицита объема пород вскрыши с требуемыми физико-механическими характеристиками на определенном этапе ведения горных работ (рисунок 10а); избыток пород вскрыши, перенос которых нецелесообразен в данный период времени, с целью исключения потери прочностных и гидроизоляционных свойств (рисунок 10б).

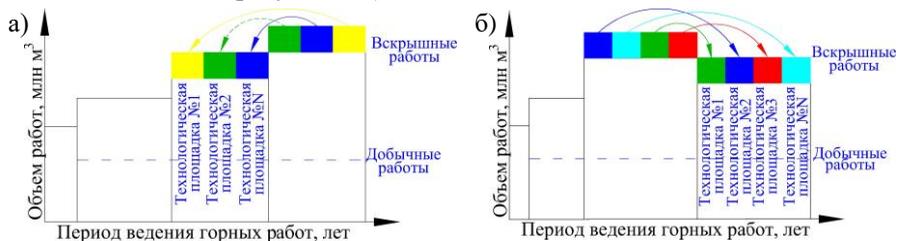


Рисунок 10 – Регулирование режима горных работ при формировании техногенного георесурса:

а) дефицит пород вскрыши; б) избыток пород вскрыши

На основе результатов исследований с использованием имитационного моделирования в среде AnyLogic, доказано, что при формировании ограждающей дамбы по периметру выработанного пространства карьера (рисунок 11), заложение равноудаленных временных съездов позволяет сократить эксплуатационные затраты в период ведения горных работ до 25% в сравнение с традиционным отвалообразованием.

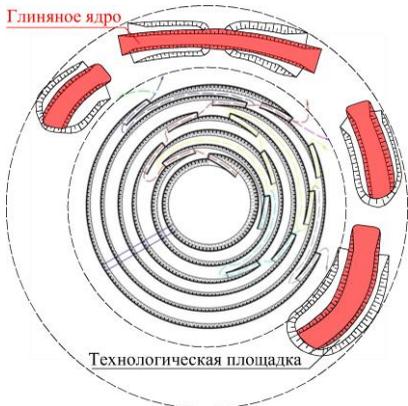
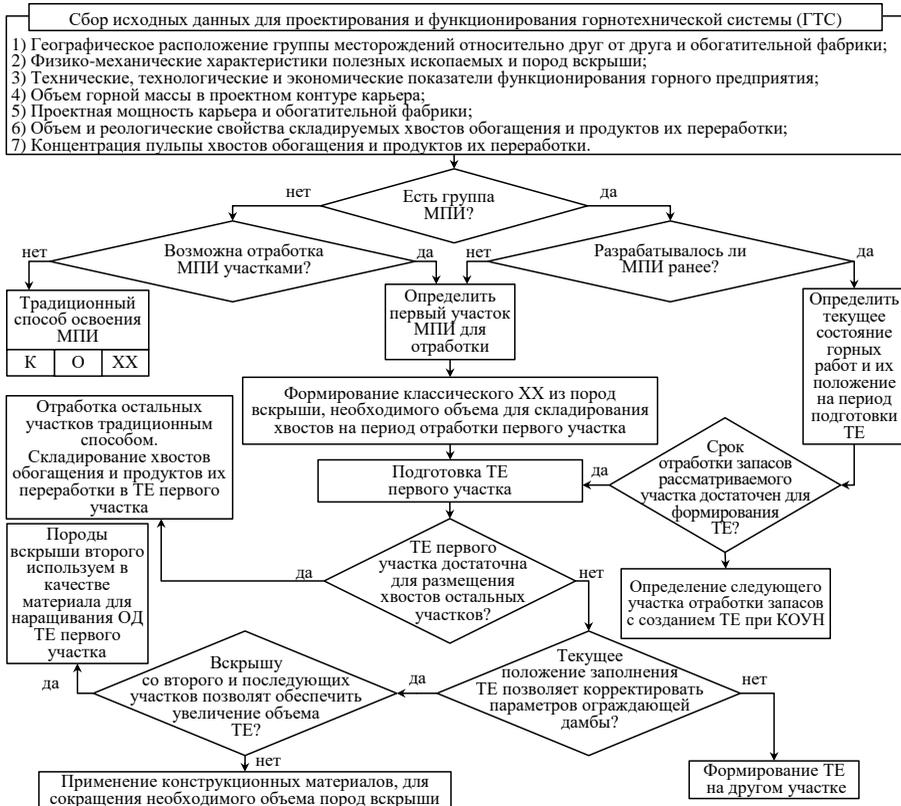


Рисунок 11 – Схема заложения съездов и технологических площадок при одновременном ведении добычных работ и формировании техногенной емкости

Определение возможности ведения горных работ с одновременным формированием техногенной емкости, при согласовании технологических процес-

Таким образом, на этапе проектирования необходимо предусматривать заложение съездов так, чтобы они совпадали с расположением технологических площадок по периметру разрабатываемого карьера, что позволит сократить затраты на транспортирование скальных и рыхлых пород, используемых в качестве строительных и изоляционных материалов. Доказано, что это достигается применением системы парных временных автомобильных съездов, обеспечивающих транспортирование полезных ископаемых на обогатительную фабрику, а породы вскрыши, в соответствии с их физико-механическими характеристиками – на технологические площадки для формирования ограждающей дамбы.

сов добычи полезных ископаемых, возведения ограждающей дамбы и объемов размещаемых хвостов обогащения, осуществляется на основе разработанного алгоритма, представленного на рисунке 12.



Примечание: МПИ – месторождение полезных ископаемых; К – карьер; О – отвал; XX – хвостохранилище; ТЕ – техногенная емкость; КОУН – комплексное освоение участка недр; ОД – ограждающая дамба

**Рисунок 12 – Алгоритм комплексного освоения участка недр при формировании техногенной емкости**

Таким образом, одновременное ведение горных работ с использованием вскрышных пород, применяемых в качестве строительных и изоляционных материалов и дифференцированных по физико-механическим характеристикам, обеспечивает повышение эффективности горнодобывающих предприятий и полноту комплексного освоения участка недр путем формирования техногенной емкости для размещения текущих хвостов обогащения руд.

*В четвертой главе проведено экономическое обоснование эффективности формирования техногенных емкостей с целью размещения хвостов обогащения руд. Выполнен расчет экономической эффективности внедрения рекомендаций на месторождениях Восточно-Семеновской группы.*

Разработанные технологические рекомендации обеспечивают одновременное формирование и эксплуатацию техногенной емкости для размещения хвостов обогащения в ходе ведения добычных работ. При этом создание ограждающих дамб осуществляется с учетом предварительного выбора мест расположения технологических площадок. На основе предложенной в работе методики обоснования параметров открытой геотехнологии оценены затраты на освоение участка недр традиционным способом ведения горных работ и с формированием техногенной емкости для размещения хвостов обогащения. Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение затрат на освоение участка недр

Объем пород вскрыши, млн м <sup>3</sup>	Площадь нарушенных земель горными работами				Транспортирование пород вскрыши		Создание системы инженерной защиты	
	Предлагаемая методика		Традиционная методика		Предлагаемая методика	Традиционная методика	Предлагаемая методика	Традиционная методика
	Площадь земли, млн м <sup>2</sup>	Затраты на аренду, млн руб.	Площадь земли, млн м <sup>2</sup>	Затраты на аренду, млн руб.	Затраты, млн руб.	Затраты, млн руб.	Затраты, млн руб.	Затраты, млн руб.
10	1,41	1,69	2,46	2,96	1352,56	5573,18	52,25	451,79
20	1,62	1,95	2,58	3,10	2918,88	11385,75	65,59	484,70
30	1,89	2,26	3,17	3,80	4666,88	20705,96	81,15	530,04
40	2,04	2,45	3,51	4,21	6448,13	29426,25	90,10	560,45

Предложенные и обоснованные в работе решения по определению очередности отработки участков Восточно-Семеновского месторождения и дифференцированию пород вскрыши, позволили подготовить технологические площадки для возведения ограждающей дамбы, сократить время ее строительства и ввода в эксплуатацию техногенной емкости, что подтверждается актом внедрения. Экономический эффект достигнут за счет сокращения площадей земель, требуемых для размещения пород вскрыши и хвостов обогащения руд, а также снижения затрат на транспортирование вскрышных пород (таблица 3).

Таблица 3 – Расчетный экономический эффект от внедрения рекомендаций на месторождениях ООО «Семеновский рудник»

Эксплуатационные затраты		Экономический эффект, млн руб.	
-на транспортирование			9,63 млн руб.
-на аренду земель		254,18 млн руб.	
-на создание инженерной системы защиты:		15,8	
-глиняное ядро;			16,04 млн руб.
- глиняный экран;			9,3 млн руб.
-конструктивный способ			4,5 млн руб.

Таким образом, ведение горных работ при формировании техногенной емкости, с учетом согласования производительности карьера по горной массе и обогатительной фабрики по хвостам, обеспечивает сокращение площади требуемых земель для размещения пород вскрыши и хвостов обогащения, снижение экологической нагрузки на окружающую среду, при сокращении эксплуатационных затрат до 65 % и повышении полноты освоения участка недр.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, дано новое решение актуальной научно-практической задачи определения параметров открытой геотехнологии, обеспечивающей формирование и эксплуатацию техногенной емкости с целью размещения хвостов обогащения руд в ходе развития горных работ для повышения полноты и комплексности освоения участка недр, имеющее важное значение для развития горнодобывающих предприятий страны. Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. На основе проведенного анализа установлен дефицит земель и отсутствие возможности формирования новых и реконструкции существующих емкостей для складирования хвостов обогащения, при росте объемов добычи и переработки полезных ископаемых.

2. В работе обоснованы способы повышения эффективности функционирования горнодобывающего предприятия за счет одновременного ведения добычных работ и использования скальных и рыхлых пород вскрыши для формирования техногенной емкости, с целью размещения хвостов обогащения, что обеспечивает снижение затрат на перемещение пород вскрыши до 18%, площади нарушенных земель до 30%, затрат на аренду земель до 2,2 раз при обеспечении их попутной рекультивации в период ведения горных работ.

3. Систематизированы техногенные емкости по расположению относительно земной поверхности, способу возведения, формируемой системе инженерной защиты и установлены требования к регулированию режима горных работ, с учетом потребности в строительных и изоляционных материалах при заданном типе, конструкции и параметрах ограждающей дамбы.

4. Разработана динамическая модель управления объемами горной массы, в зависимости от дальности транспортирования, типа применяемого подвижного состава и месторасположения рыхлых и скальных пород в массиве и контуре техногенной емкости, позволяющая установить рациональные параметры и расположение технологических площадок для возведения ограждающих дамб заданной конструкции.

5. Доказано, что для повышения вместимости техногенной емкости, при снижении площади ее основания, необходимо использовать габионные конструкции. Установлено, что при соотношении рыхлых пород к скальным менее 25% в общем объеме вскрышных пород, необходимо применять габионные стены для формировании угла внутреннего откоса ограждающей дамбы до  $89^\circ$  при высоте до 25 м.

6. Разработаны алгоритмы последовательности работ при комплексном освоении участка недр и формировании техногенной емкости, учитывающие стадию горных работ, наличие нескольких участков залежей, вид инженерной системы защиты, объем и физико-механические свойства вскрышных пород, использование которых позволяет определить параметры схемы вскрытия, режим горных работ, а также высоту ограждающей дамбы с углами внутреннего откоса до  $89^\circ$  и внешнего откоса от  $12^\circ$ .

7. Установлена зависимость производительности карьера по горной массе от производственной мощности обогатительной фабрики при одновременном ведении добычных работ и формировании техногенной емкости для размещения

хвостов обогащения. Определено, что при годовом объеме переработки полезного ископаемого 5-10 млн. т и глубине карьера 100-300 м, возможность формирования техногенной емкости с использованием объемов вскрыши, вынимаемых из карьерного поля, достигается при значении текущего коэффициента вскрыши не менее  $5-7 \text{ м}^3/\text{т}$ .

8. Предложена номограмма согласования производительности карьера по горной массе и обогатительной фабрики по объему хвостов, учитывающая объем вскрыши в проектном контуре карьера, высоту ограждающих дамб и вместимость техногенной емкости, использование которой на этапе установления параметров карьера позволяет определить требуемые объемы рыхлых и скальных пород.

9. Экономически обоснована эффективность формирования техногенной емкости для размещения хвостов обогащения в условиях месторождений ООО «Семеновский рудник», эффект составил 15,8 млн руб. в год.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:  
В изданиях, рекомендованных ВАК России и входящих в международные  
базы цитирования Web of Science**

1. Кравчук, Т.С. Методика определения параметров техногенной емкости для условий крутопадающих месторождений полезных ископаемых / Т.С. Кравчук, И.А. Пыталев, Е.Е. Швабенланд, **В.В. Якшина** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2021. – № 4. – С. 425-435.
2. Зотеев, О.В. Исследование возможности применения габионных конструкций при комплексном освоении георесурсов / О.В. Зотеев, Т.С. Кравчук, И.А. Пыталев, **В.В. Якшина** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 4. – С. 179-189.
3. Зотеев, О.В. Особенности формирования техногенной емкости на базе существующих внешних отвалов вскрышных пород / О.В. Зотеев, И.А. Пыталев, **В.В. Якшина**, И.В. Гапонова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 3. – С. 22-36.

**Патенты**

1. Патент на изобретение № 2719894 РФ. Способ совмещения работ по добыче полезных ископаемых и восстановлению земель при разработке крутопадающих месторождений / И.А. Пыталев, В.В. Якшина, А.Б. Аллабердин, А.С. Валеев. – Оpubл. 23.04.2020, Бюл. № 12.

**В прочих изданиях**

1. Зотеев, О.В. Обоснование технических решений по созданию и эксплуатации техногенной емкости, формируемой на базе внешних отвалов для размещения обезвоженных хвостов обогащения в условиях Гайского горно-обогатительного комбината / О.В. Зотеев, С.Е. Гавришев, **В.В. Якшина** [и др.] // Комбинированная геотехнология: переход к новому технологическому укладу: Сборник статей по результатам Международной конференции, Магнитогорск, 27–31 мая 2019 года. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. – С. 240-248.
2. Якшина, В.В. Способы создания и гидроизоляции техногенной емкости с использованием пород вскрыши / **В.В. Якшина** // Актуальные проблемы горного дела. – 2019. – № 2. – С. 42-48.

3. Гавришев, С.Е. Способы обеспечения заданных характеристик техногенных георесурсов, создаваемых в процессе ведения открытых горных работ / С.Е. Гавришев, И.А. Пыталев, И.В. Гапонова, **В.В. Якшина** // Современные достижения университетских научных школ: Сборник докладов национальной научной школы-конференции, Магнитогорск, 26–27 декабря 2018 года. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. – С. 126-130.
4. Пыталев, И.А. Обоснование возможности создания техногенных пространств на базе внешних отвалов для размещения продукта сгущения хвостов обогащения Гайского горно-обогатительного комбината / И.А. Пыталев, **В.В. Якшина**, И.В. Гапонова // Актуальные проблемы горного дела. – 2018. – № 2. – С. 24-30.
5. Гавришев, С.Е. Особенности организации горнотранспортной схемы при формировании и использовании техногенных георесурсов / С.Е. Гавришев, И.А. Пыталев, И.В. Гапонова, **В.В. Якшина** // Современные достижения университетских научных школ: Сборник докладов национальной научной школы-конференции, Магнитогорск, 26–27 декабря 2019 года. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. – С. 152-156.